

李文倩, 陈紫佳, 武赟婷. 突发地震诱发火灾背景下的办公楼应急疏散仿真研究[J]. 华南地震, 2024, 44(3): 59-70. [LI Wenqian, CHEN Zijia, WU Yunting. Simulation on Emergency Evacuation in Office Buildings During Fire Disasters Resulted from Sudden Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(3): 59-70]

突发地震诱发火灾背景下的办公楼 应急疏散仿真研究

李文倩, 陈紫佳, 武赟婷

(天津城建大学 经济与管理学院, 天津 300384)

摘要: 突发地震危害巨大, 往往伴随有火灾等次生灾害。火灾灾害发生后, 合理组织人员撤离、有效减少拥挤踩踏事故、提高人们在应对灾害时的疏散效率尤为重要。利用Pathfinder疏散软件模拟了国内某办公楼人员在地震诱发火灾发生时的紧急疏散情况, 并采用控制变量的方法对人员行为、人员速度、人员比例等不同参数设置下的疏散情景进行研究。结果发现人员速度和人员比例是影响人员疏散的主要因素, 增加速度或者降低中老年人的比例会减少疏散时间, 但增大速度或者改变人员比例到一定界限所带来的影响会慢慢减弱。提出了火灾延时疏散的策略, 对优化人员逃生行径以及规范人员密集区域应急疏散管理具有很好的参考价值。

关键词: 突发地震; 火灾灾害; 应急管理; Pathfinder仿真; 人员疏散; 疏散时间

中图分类号: X45

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2024)03-0059-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.03.07

Simulation on Emergency Evacuation in Office Buildings During Fire Disasters Resulted from Sudden Earthquake

LI Wenqian, CHEN Zijia, WU Yunting

(School of Economics and Management, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Sudden earthquakes pose enormous risks, often accompanied by secondary disasters such as fires. It is particularly important to reasonably organize the evacuation of people, effectively reduce congestion and stampede accidents, and improve the evacuation efficiency of people in response to the disaster when the fire disaster breaks out. The Pathfinder evacuation software was used to simulate the emergency evacuation of the personnel in an office building in China when an earthquake-induced fire occurred. The evacuation scenario under different parameter settings such as personnel behavior, personnel speed, and personnel proportion was studied by using the control variable method. The results indicate that the personnel speed and personnel proportion are the major factors affecting personnel evacuation. Increasing the personnel speed or reducing the proportion of the elderly will shorten the evacuation time, but increasing the personnel speed or changing the personnel proportion to a certain limit will

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 天津市哲学社会科学规划项目“双重嵌入视角下突发事件政府应急决策机制及效能提升研究”(TJGLQN20-004)

作者简介: 李文倩(1986-), 女, 讲师, 研究方向为灾害应急避难与安全评价研究。

E-mail: bxqe@163.com

gradually weaken the influence. The research put forward the delay evacuation strategy during fire disasters, which has a good reference value for optimizing the personnel escape behavior and standardizing the emergency evacuation management in densely populated areas.

Keywords: Sudden earthquake; Fire disaster; Emergency management; Pathfinder simulation; Personnel evacuation; Evacuation time

0 引言

突发地震灾害破坏性巨大,并极易引起火灾等次生灾害,对人类生命财产造成巨大损失。办公楼由于其自身结构与布置较为复杂,受地震影响易造成内部电气线路或设备、输气管路损坏等情况而形成起火源,一旦发生火灾,烟气会迅速蔓延,短时间内会造成建筑破坏、通道阻塞,甚至发生人员伤亡情况。考虑到突发诱发火灾的危害性,针对办公楼开展火灾应急疏散研究,探寻突发火灾下最优的疏散路径与方案迫在眉睫。然而,由于建筑结构型式的多样性,火灾发生时的不确定性因素也较多,真人演练往往不符合实际火灾发生时环境状况与人员心理特征。因此,采用仿真软件建模对突发火灾下人员疏散情况进行分析具有更好的可实施性。

目前研究火灾疏散情况的方法以仿真模型构建为主。Thiago^[1]首次基于连续和单值网络的逻辑图,提出了一种火灾紧急疏散情况下评估人类认知行为的方法,解决了在疏散过程中仿真模型无法模拟与考虑人类认知方面的问题。此后,模拟软件的成熟发展为研究人员密集空间内的疏散规律提供了更直观的工具。Li等^[2]利用基于Agent技术的Pathfinder软件对地铁站人员疏散过程进行仿真。赵哲等^[3]首次运用Pathfinder和FDS+Evac模型,建立了高层建筑的人员疏散模型,发现Steering模型更加适合公众聚集场所的应急诱导疏散。杜晓燕等^[4]通过Pathfinder软件对一个三层的车间进行仿真模拟,改善了车间管理水平,为保障工人安全提供参考。

为保障在特殊情况下人员的安全疏散,特定空间和场所内应急疏散的方法选择及其优化方面的研究逐渐受到学者们的重视。张丽姣^[5]利用Pathfinder软件为北京市雍和宫招聘会现场人员的疏散提出了最佳疏散方案。赵小惠^[6]对学生公寓楼三种不同疏散情景下的疏散时间进行了比较,提出了一种高层建筑电梯和楼梯混合疏散的策略。

马清源等^[7]采用Pathfinder软件对国内某高铁车站的重要疏散节点处行人的疏散过程进行研究,并提出了合理的客流组织建议。在应急疏散方案制定和优选过程中,众多主观和客观的因素也应该被考虑在模拟仿真过程中,特别是疏散人员的特点尤为重要。袁松如^[8]采用Pathfinder软件进行了人员的疏散模拟,研究了某建筑物出口参数会对疏散造成影响。陈岩^[9]采用了Pathfinder疏散模拟软件对某医院住院楼进行模拟研究,发现电梯疏散可以减少疏散时间、缩短疏散距离,提高了疏散效率。田水承等^[10]分别对不同出口形状、群体中人员构成、人员初始位置进行疏散模拟发现出口形状对疏散时间有显著影响。王志帅等^[11]运用Pathfinder软件对高校办公楼人员进行疏散模拟,分析了疏散总人数、环境温度、环境能见度对疏散效率的影响。

随着社会主义现代化进程加速,特定灾害情境下的人员疏散获得广泛关注,由此出现大量火灾期间人员疏散特征及规律的研究。Li等^[12]通过对温度、烟层高度和能见度进行比较,模拟了火灾期间图书馆烟雾的扩散和人员疏散。Qin等^[13]对地铁专用站的人员疏散进行了模拟,通过设置火灾场景和改变站内流量,分析了不同状态下的人员疏散。黄有波等^[14]以某工业园区物流综合办公楼为例,运用Pathfinder软件以及FDS模型建立起了人员疏散模型和火灾烟气模型,并提出了疏散改进措施。陈雅萌等^[15]通过Pathfinder构建高校学校宿舍模型来模拟火灾产生的过程,发现增加出口数量、楼梯宽度和楼梯数量能有效减少疏散时间。涂沁颖等^[16]利用Pathfinder软件研究了重庆某枢纽站火灾疏散问题,计算获得了安全疏散时间。阎卫东等^[17]利用Pathfinder软件对沈阳建筑大学图书馆进行疏散仿真研究,分析火灾时人员疏散行为特征、楼梯利用率及堵塞情况、疏散出口通过率以及人员安全疏散时间。上述研究对火灾发生后人员快速疏散、减少人员生命财产损失具有很好的指导意义。

综上所述,现有研究主要集中在对建筑物火

灾工况、安全疏散时间以及出入口设置的优化和改进措施等方面的研究,而针对人员速度、人员比例及延时疏散策略等因素变化对疏散时间影响的研究较少。因此,本文以地震灾害背景下的某办公楼为研究对象,借助Pathfinder软件构建仿真模型,通过改变参数模拟了不同参数设置下的次生火灾疏散情况,分析人员速度和人员比例对疏散时间的关系,提出延时疏散的策略,研究对优化人员逃生行径以及规范人员密集区域应急疏散管理有一定的参考价值。

1 基于Pathfinder的应急疏散仿真

1.1 办公楼疏散模型建立

本文采用Pathfinder 2019 x64软件(如图1所示)进行分析,可以通过设置年龄、性别、身高和行走速度等人员参数来构建分析模型,对人群疏散行为进行有效控制,并在建模后为用户提供三维模拟视频(如图2所示),实现疏散过程的可视化分析。

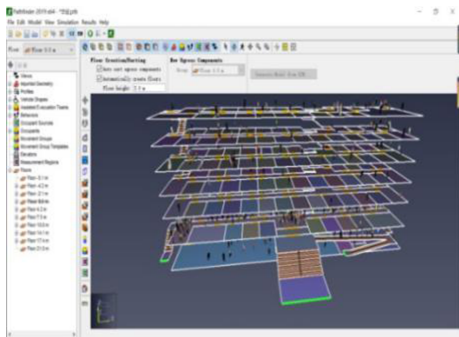


图1 软件界面
Fig.1 Software interface



图2 疏散视频
Fig.2 Evacuation video

本文所研究的办公楼地上共六层,地下为一层。总建筑面积5028 m²,建筑耐火等级为二级。

地上首层层高为4.2 m,二层至五层层高为3.3 m,六层层高为3.6 m,建筑总高度23.1 m。每层设置两个楼梯间,西侧梯段宽度1.325 m,东侧为1.225 m。利用Pathfinder软件从坐标原点(0,0,0)开始绘图,包括楼层、房间、走道、楼梯转角缓台平面并添加人员,初步建立办公楼疏散模型。人员疏散模型如图3所示。

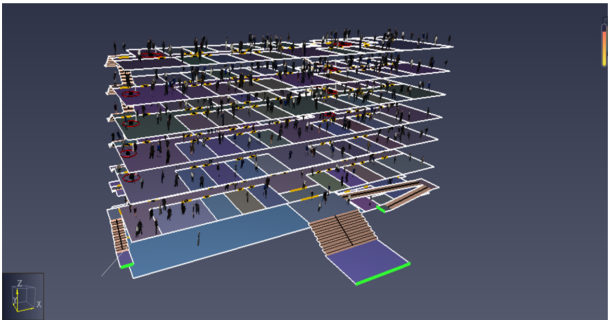


图3 基于Pathfinder软件建立办公楼疏散模型
Fig.3 Office building evacuation model based on Pathfinder software

1.2 疏散模型的参数设置

根据我国《办公建筑设计规范》^[18],普通办公室每人使用面积不应小于4 m²,所以普通办公室的人员密度设置为0.25人/m²,人员设置为随机分布。通过计算建筑物内每层办公室面积和人员密度来确定每层的人数,计算得知该模型中一至六层共计620人,见表1所示,其中20人平日在地下室活动。人员运动模式选择Steering模式^[6],其采用合理的路径规划以及躲避原则,更加符合人员在突发灾害疏散时的实际心理,减少了人员拥挤,疏散效率也更高。

表1 疏散人员数量
Table 1 Number of evacuees

办公室	办公室面积/m ²	人员密度	人数
一层	356	0.25	89
二层	453		113
三层	453		113
四层	453		113
五层	453		113
六层	316		79
总计	2403		620

1.3 初始参数人员疏散结果分析

本文所研究办公楼建筑耐火等级为二级,根

据建筑法规要求^[19]：一、二级耐火等级的民用建筑与高层建筑，其允许疏散的时间为5~7 min，因此，本研究中人员安全疏散时间应该至少控制在420 s之内。同时，根据办公楼楼层与楼梯布置情况，考虑地震灾害影响下诱发办公楼内不同起火点位置，共设置十三个研究工况，分别如下：

工况一：任意楼层中间着火，所有楼梯正常通行；

工况二：一层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况三：一层东侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况四：二层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况五：二层东侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况六：三层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况七：三层东侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况八：四层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况九：四层东侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况十：五层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况十一：五层东侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况十二：六层西侧楼梯口着火，其他楼梯正常通行；

工况十三：六层东侧楼梯口着火，其他楼梯正

常通行。

疏散仿真初始设定的人员参数见表2所示，在人员类型、人员速度、人员比例等初始参数条件下，可模拟得出上述不同工况下620人所需的疏散时间，见表3所示。可以看出，当未对人群进行有序的疏散指导时，人员疏散时间较长，均超过了420 s的安全疏散时间，办公楼内人员疏散情况如图4~6所示。通过上述仿真发现，火场中火势蔓延的速度很快，如果不对人员进行合理有序的疏散，可能会造成很严重的人员伤亡事件和极大的财产损失。因此，下面将采用控制变量的方法，对人员参数进行优化设置，以期提高疏散效率。

表2 初始人员参数^[5]

Table 2 Initial personnel parameters^[5]

人员类型	人员速度/(m·s ⁻¹)	人员比例/(%)
青年男性	1.35	40
青年女性	1.15	40
中老年人	0.8	20

表3 不同工况初始疏散时间

Table 3 Initial evacuation time under different conditions

楼层	西侧楼梯作为火源点的疏散时间/s	东侧楼梯作为火源点的疏散时间/s
一层	528.5	537.0
二层	564.0	544.5
三层	565.8	506.8
四层	610.3	492.5
五层	601.3	475.5
六层	544.0	480.0

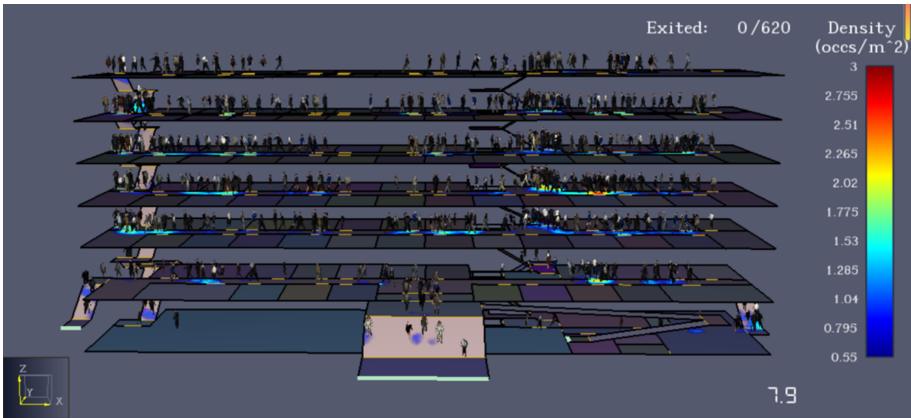


图4 人员疏散开始

Fig.4 Beginning of personnel evacuation

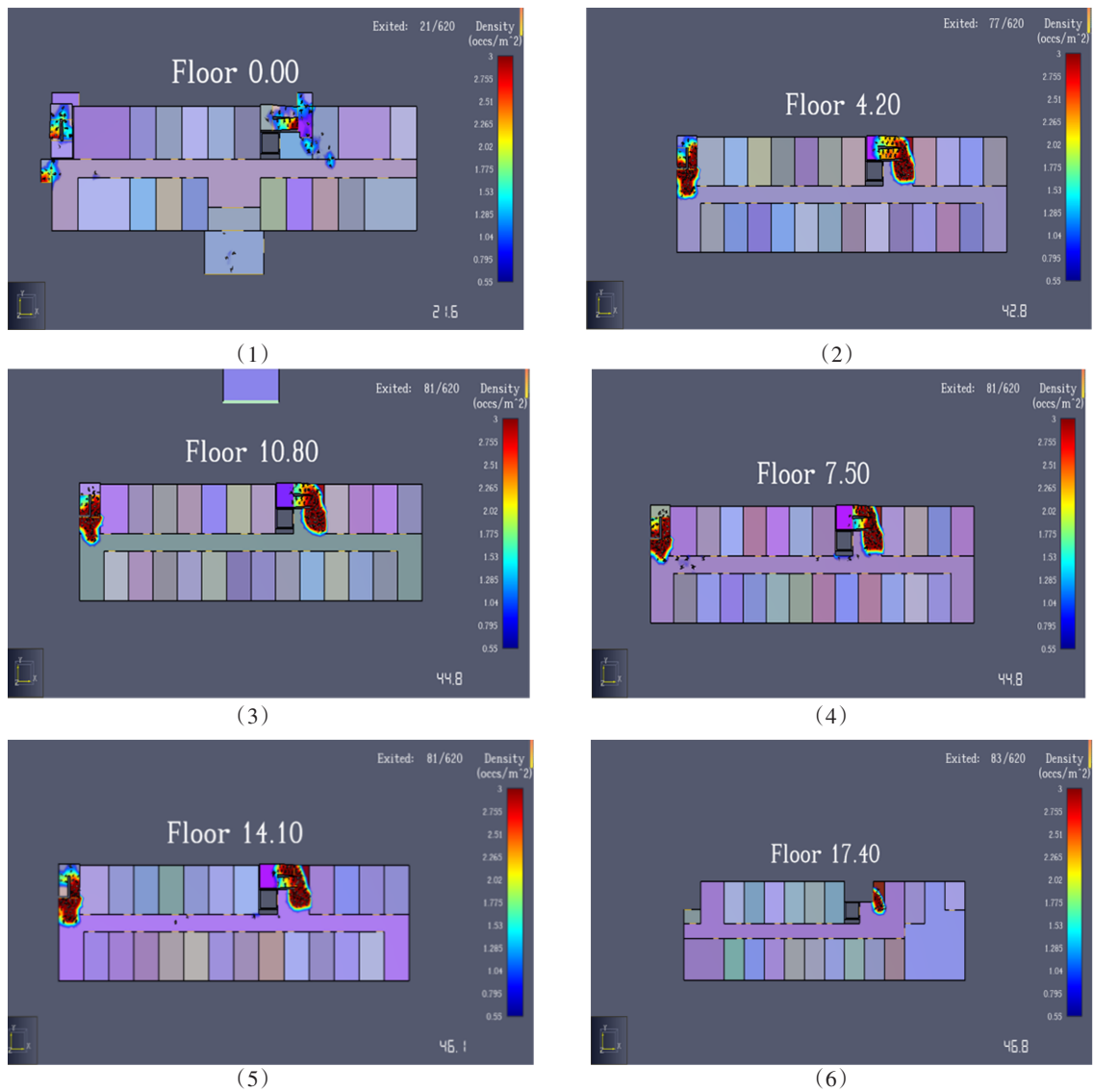


图5 工况一情况下一层至六层人员疏散图

Fig.5 Personnel evacuation from the first to sixth floors under condition 1

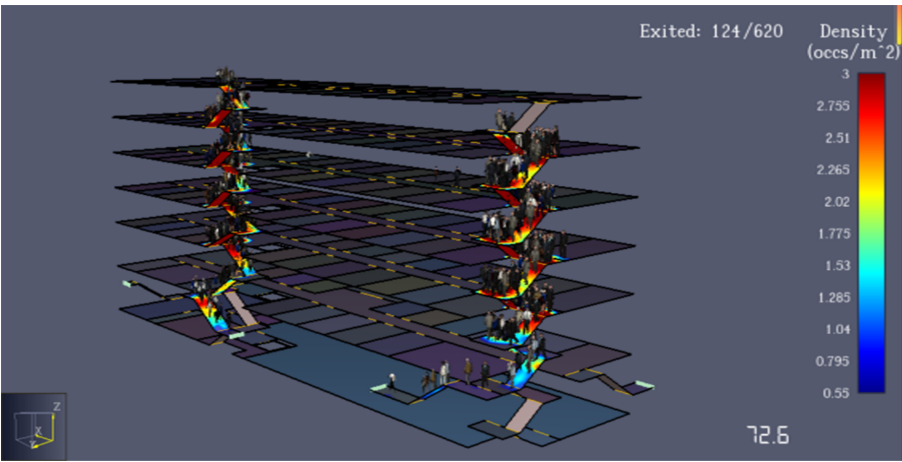


图6 两侧疏散楼梯疏散示意图

Fig.6 Evacuation using stairs on both sides

2 疏散时间敏感性分析

2.1 改变人员速度

在保持人员比例结构不变的情况下，研究提高人员速度对疏散时间的影响。研究选择速度增量区间为0%至20%，计算获得疏散时间(见表4所列)，疏散时间与速度增量关系如图7所示。由表4可知，当人员速度增量从0%变化到20%时，各工况的疏散时间平均下降82.5 s，速度平均每增加1%，疏散时间约下降4 s。由图7可以看出，人员速度的增加，使得疏散时间降低的同时，某些工况下还出现加重楼梯口处的人员拥堵的情况。特别是当人员速度增量在16%至18%之间时，出现了由于速度增加所带来的拥堵作用逐渐加剧现象，导致两者的作用逐渐趋于一致，所以疏散时间变化率趋于平缓。此外，由计算结果可以看出，当速度增加量为20%

时，仅有工况九、工况十一、工况十三的总疏散时间小于420 s，符合安全要求。而其他工况下，如果仅仅改变人员速度显然不能直接达到全员安全疏散的标准。

2.2 规范人员行为

造成火灾事故中人员伤亡的重要原因之一，就是人员在火灾发生时的群体性慌乱行为，造成了疏散过程中长时间的拥挤，最终发展成踩踏或伤亡事故。因此，在火灾灾害中保持人员的有序疏散的重要性不言而喻。若保持人员速度和人员比例结构不变，利用添加航点指引行为(如图8所示)，并将行为和对应的安全出口相关联，即可实现对人员疏散行为的有序指导。以整个建筑的中轴线为界，分为东西两侧，人员会先分别到两侧对应航点处再从对应的疏散出口出去。为了减少拥挤，在人员速度不变且有序疏散的情况下，采取延时疏散的策略，即增加等待时间。

表4 提高人员速度后各工况疏散时间
Table 4 Evacuation time under various conditions after increasing personnel speed

速度提高比例/ (%)	疏散工况/ s												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	539.8	528.5	537.0	564.0	544.5	565.8	506.8	610.3	492.5	601.3	475.5	544.0	480.0
1	510.5	508.0	518.8	558.3	555.5	551.0	496.8	604.8	477.8	572.3	472.0	531.5	468.3
2	527.0	516.0	517.0	540.5	538.0	549.3	490.0	602.8	489.3	576.0	475.0	525.0	466.8
3	513.5	496.3	507.0	552.8	542.0	557.8	492.0	597.0	471.8	569.0	464.8	539.0	480.0
4	516.0	521.8	533.8	556.0	530.8	539.8	499.3	578.8	480.5	556.8	462.0	519.5	460.5
5	504.5	504.5	517.0	557.3	524.5	530.8	487.0	587.0	461.8	577.8	460.8	520.0	481.3
6	488.3	488.3	491.8	533.5	533.0	531.8	481.8	577.8	467.3	563.5	452.8	513.3	449.8
7	489.0	489.0	494.5	530.8	517.3	518.3	477.0	561.3	464.8	545.8	447.3	513.0	452.3
8	502.0	502.0	519.8	536.0	531.8	519.8	475.3	564.3	458.0	547.8	450.3	502.3	446.0
9	482.0	486.5	496.0	527.0	514.0	525.8	472.3	569.3	456.5	553.8	449.0	514.8	444.3
10	477.3	479.3	504.5	512.3	513.8	518.3	460.8	570.0	453.0	535.8	448.3	496.3	442.5
11	489.5	498.0	499.5	490.0	504.3	509.5	464.5	559.0	450.3	535.5	434.5	490.5	445.3
12	498.3	483.5	475.8	490.0	508.5	501.8	449.3	550.8	441.8	532.5	431.8	485.3	439.0
13	463.0	496.8	488.0	496.0	475.8	504.5	458.3	552.3	441.5	526.8	426.5	471.3	426.5
14	469.8	472.5	457.0	501.0	493.0	490.0	448.8	548.8	437.8	529.5	436.3	484.3	423.3
15	475.3	475.3	448.3	481.8	501.5	476.3	464.5	541.8	436.5	521.5	425.0	474.8	422.3
16	451.0	446.3	452.5	485.5	489.5	492.0	440.5	540.0	438.5	521.0	422.5	466.5	429.3
17	452.3	452.3	467.0	497.8	482.8	477.8	437.5	527.8	428.8	500.0	422.3	479.0	412.5
18	476.8	490.8	475.0	492.3	476.8	474.0	438.3	526.3	430.0	503.3	411.3	471.8	425.5
19	446.5	429.3	427.3	464.0	467.8	482.0	433.5	523.5	416.3	505.5	406.8	442.3	413.3
20	463.8	461.5	450.5	463.3	461.0	473.5	425.0	526.3	419.3	506.5	412.5	444.8	410.0

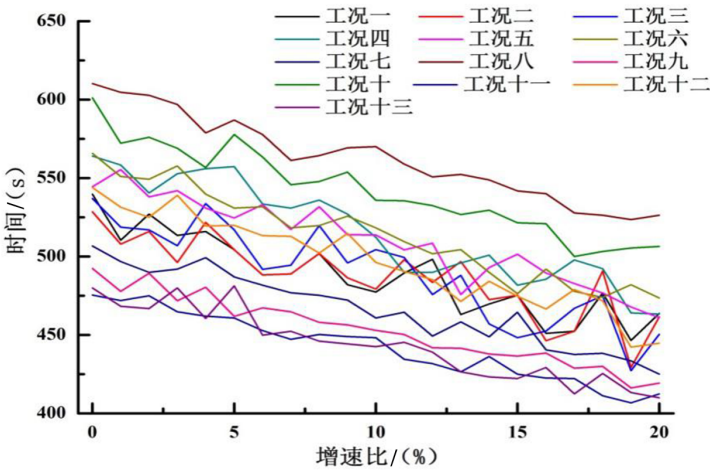


图7 速度改变对疏散时间的影响

Fig.7 Influence of speed changes on evacuation time

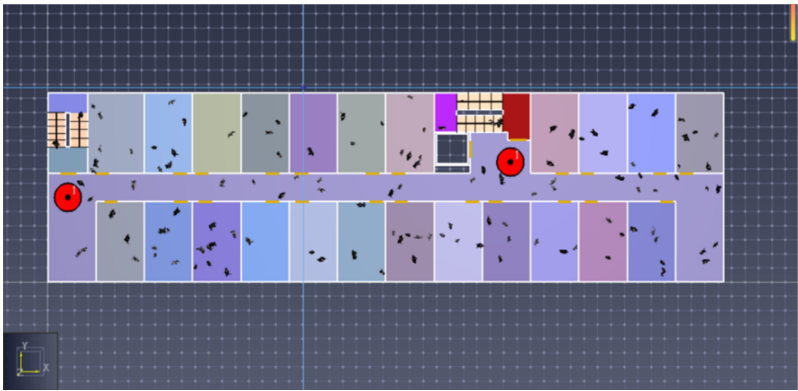


图8 航点设置图

Fig.8 Waypoint setting

2.2.1 方案一

二层人员疏散效果图如图9所示,由图可知二层人员疏散至楼梯口大约要30 s左右,如果所有人员进行同一时间疏散,可能会加重楼梯口的拥挤,故考虑采取延时疏散的策略。方案一是将三层至六层人员分别引导到对应的航点处,分别等待30 s、

40 s、50 s、60 s之后再行疏散。调整方案后各工况下疏散总时间前后对比见表5所列,可以看出方案调整后疏散总时间相对原方案有明显减少,疏散时间平均可降低19.5 s,说明采用方案一有利于火灾突发时人员的紧急疏散。

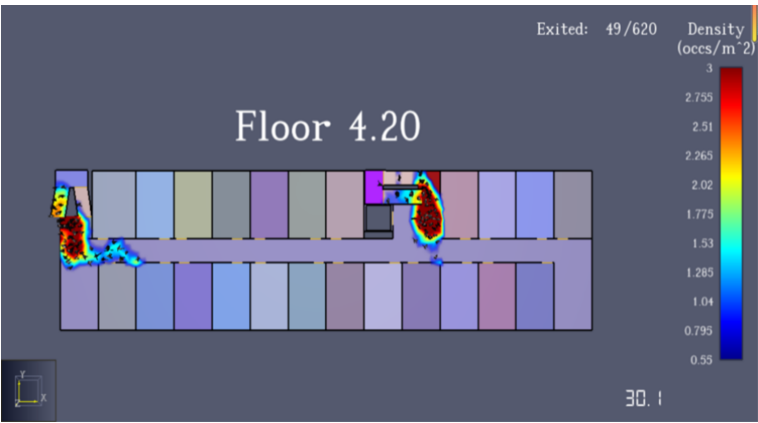


图9 二层人员疏散效果图

Fig.9 Personnel evacuation effect on the second floor

表 5 按方案一调整前后各工况下疏散总时间前后对比

状态	疏散工况/s												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
调整前	539.8	528.5	537.0	564.0	544.5	565.8	506.8	610.3	492.5	601.3	475.5	544.0	480.0
调整后	510.3	510.3	521.3	530.0	540.3	534.0	473.3	590.3	491.5	553.5	483.5	528.0	470.5

在方案一基础上再提高人员疏散速度，计算各工况疏散时间见表6所列，其对疏散时间的影响规律如图10所示。可以看出，通过方案一规范人员行为，使三层至六层人员分别到对应航点处等待一定时间可有效减少疏散时间，其原因是规范人员行为减轻了楼梯口处的人员拥堵，间接地加快了人员的疏散速度。然而，对于部分工况如工况九、工况十三等，疏散时间相对降低较少，甚至在一些速度增量情况下反而增加了疏散时间。

其主要原因是这些工况下规范人员行为没有保证疏散楼梯的有效利用。因此，针对不同工况应提前设定不同的疏散方案，达到采用不同的疏散方案以实现减少疏散时间的目的。采用方案一对人员的行为进行有序指引之后，当人员速度增量从0%变化到20%时，各工况的疏散时间平均下降72.2 s。然而，其中仅有工况七、工况十一、工况十三的总疏散时间小于420 s，因此还可对疏散方案做进一步优化调整。

表 6 方案一时提高人员速度后各工况疏散时间

速度提高比例/ (%)	疏散工况/s												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	510.3	510.3	521.3	530.0	540.3	534.0	473.3	590.3	491.5	553.5	483.5	528.0	470.5

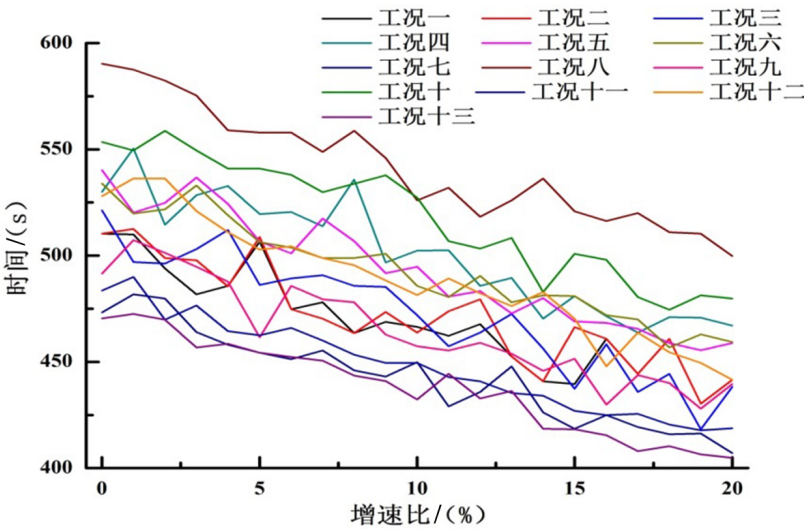


图 10 速度改变对疏散时间的影响(方案一)

Fig.10 Influence of speed changes on evacuation time (Plan 1)

2.2.2 方案二

方案二是三层至六层人员分别引导到对应的航点处，分别等待30 s、50 s、70 s、90 s之后再行疏散。调整方案后各工况下疏散总时间前后对比见表7所列，可以看出方案调整后疏散总时间相

对原方案有明显减少，疏散时间平均可降低19.7 s，说明采用方案二有利于火灾灾害突发时人员紧急疏散。

在方案二基础上再提高人员疏散速度，计算各工况疏散时间见表8所列，其对疏散时间的影响

规律如图 11 所示。由结果可以看出，延长四层至六层的等待时间，在工况一情况下，进一步减少疏散时间，其原因因为增加了楼梯的有效利用，减少了楼梯口处的人员拥堵。延长等待时间，减少楼梯拥堵，让人们的移动速度可以进一步发挥，进而减少疏散时间，但是也不可一味的延长等待时间，需要找到楼梯使用效率的极值，使等待时间和楼梯疏散效率达到平衡点，做到最大化的减少疏散时间。采用方案二对人员的行为进行有序指引之后，当人员速度增量从 0% 变化到 20% 时，各工况的疏散时间平均下降 74.6 s，相对方案一降低 2.4 s。其中虽然仅有工况七、工况十一、工况十三的总疏散时间小于 420 s，不容忽视的是工况一、工况二、工况三、工况九的总疏散时间已接近安全标准，说明通过合理方案规范人员行为可以达到降低疏散时间的效果。

表 7 按方案二调整前后各工况下疏散总时间前后对比

Table 7 Comparison of total evacuation time of Plan 2 before and after adjustment under various conditions

状态	疏散工况/ s												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
调整前	539.8	528.5	537.0	564.0	544.5	565.8	506.8	610.3	492.5	601.3	475.5	544.0	480.0
调整后	498.0	498.5	495.8	541.8	540.0	540.0	485.0	584.0	499.5	560.5	478.5	537.5	474.3

表 8 方案二时提高人员速度后各工况疏散时间

Table 8 Evacuation time of Plan 2 under various conditions after increasing personnel speed

速度提高比例/ (%)	疏散工况/ s												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	498.0	498.5	495.8	541.8	540.0	540.0	485.0	584.0	499.5	560.5	478.5	537.5	474.3
1	501.8	501.8	486.8	541.5	507.3	534.3	467.8	591.3	502.5	561.0	483.5	528.5	471.8
2	487.3	487.3	492.8	530.3	510.5	525.3	468.3	572.8	489.0	547.0	476.3	522.3	473.0
3	496.0	496.0	490.8	537.3	515.8	518.5	465.8	568.5	484.0	547.3	471.5	516.5	470.8
4	506.3	506.3	494.3	521.8	511.8	520.0	457.3	562.5	490.0	551.0	470.3	517.0	463.5
5	488.8	486.0	493.0	522.0	502.0	504.0	451.8	559.8	494.0	531.3	471.3	511.3	461.3
6	482.0	474.0	476.0	518.3	506.3	498.3	457.3	551.8	483.5	530.0	468.0	512.0	463.8
7	467.5	468.5	483.8	503.8	494.0	502.3	451.0	542.3	480.0	524.8	465.8	503.8	451.3
8	469.5	468.8	480.8	509.5	498.8	511.5	447.0	547.3	472.0	532.8	444.5	489.3	443.5
9	461.5	472.8	465.8	508.5	484.3	504.5	445.3	540.8	467.3	523.0	450.5	497.8	443.0
10	454.3	453.3	452.8	486.3	479.0	494.5	448.0	537.0	460.0	514.3	455.3	487.8	451.8
11	461.0	458.8	448.8	489.0	488.8	481.3	427.8	531.8	461.3	514.3	450.3	482.0	434.3
12	452.5	452.5	431.0	484.5	468.8	493.3	438.0	528.3	462.5	501.3	441.3	495.3	438.5
13	443.8	443.8	445.3	484.8	467.0	477.5	434.8	521.3	448.8	501.8	438.8	482.8	442.5
14	432.3	432.3	434.5	475.0	463.0	482.8	421.5	528.5	441.8	502.5	438.3	471.3	427.0
15	436.3	439.0	434.5	466.0	459.3	471.8	430.8	513.3	444.5	496.5	432.0	455.8	429.0
16	435.8	435.8	431.3	462.3	468.0	467.8	427.5	515.5	433.0	490.8	429.5	477.8	428.5
17	452.0	452.0	427.8	463.8	457.3	469.8	424.5	507.0	438.5	482.5	425.3	456.8	427.0
18	429.8	438.8	418.0	462.8	454.8	467.5	415.3	507.5	435.0	483.8	417.5	467.5	416.3
19	434.5	434.5	427.0	467.0	454.8	454.8	406.0	497.5	424.5	476.0	422.5	439.3	418.5
20	432.3	432.3	425.3	455.0	450.8	450.0	408.5	500.3	432.8	486.0	419.0	456.0	415.0

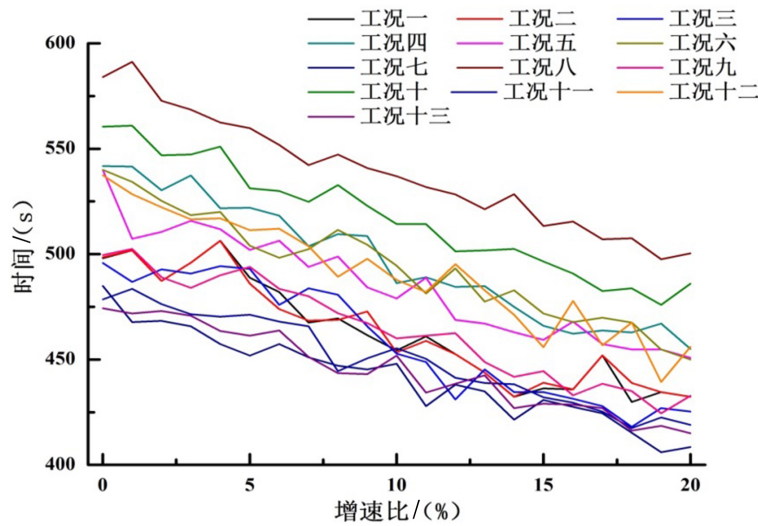


图 11 速度改变对疏散时间的影响(方案二)
Fig.11 Influence of speed changes on evacuation time (Plan 2)

2.3 改变人员比例

此外，办公楼内部人员比例结构的变化也会对疏散平均速度以及疏散时间存在明显的影响。在保持人员速度不变的条件下，设定青年男性与青年女性比例相等，模拟中老年人比例从0%变化

到40%的区间下对疏散时间的变化规律。分别选择原方案中疏散时间最多的工况八与用时最少的工况十一作为研究案例，分别在方案一和方案二规范人员行为基础上，计算不同人员速度时的疏散时间见表9与表10所列。

表 9 中老年人比例改变后工况八的疏散时间
Table 9 Evacuation time under condition 8 after changing proportion of the elderly

速度提高比例/(%)	10%		20%		30%		40%	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
0	563.3	552.5	590.3	584.0	631.3	632.5	663.5	655.5
1	557.3	553.8	587.5	591.3	645.8	619.3	657.0	649.8
2	568.3	544.3	582.3	572.8	620.0	615.3	651.3	646.5
3	565.8	547.3	575.3	568.5	619.3	601.5	643.0	639.0
4	539.3	535.3	559.0	562.5	593.3	614.3	643.3	640.5
5	535.5	543.0	558.0	559.8	603.3	594.0	650.5	631.3
6	537.5	532.5	558.0	551.8	600.5	578.3	626.5	629.3
7	536.8	527.3	548.8	542.3	603.0	596.3	612.8	619.3
8	525.8	524.5	558.8	547.3	581.8	578.3	617.5	617.8
9	516.0	524.8	546.0	540.8	579.8	590.8	625.0	612.0
10	507.3	512.3	526.0	537.0	581.0	579.8	597.8	612.0
11	512.3	498.0	532.0	531.8	580.8	574.0	593.3	590.8
12	506.0	496.0	518.3	528.3	568.5	575.8	600.5	598.3
13	511.3	495.5	526.0	521.3	574.5	570.0	607.0	599.8
14	494.0	490.8	536.3	528.5	553.3	559.5	597.0	588.0
15	500.8	483.5	520.8	513.3	551.5	559.8	584.0	588.0
16	494.3	483.5	516.3	515.5	554.5	550.8	580.3	574.0
17	487.5	487.0	520.0	507.0	557.0	542.0	569.3	572.5
18	480.8	483.0	511.0	507.5	549.5	537.5	572.5	585.0
19	476.8	483.0	510.3	497.5	555.3	539.0	564.3	570.3
20	478.0	475.0	499.8	500.3	533.0	530.0	555.5	563.5

注:(单位:s)

表 10 中老年人比例改变后工况十一的疏散时间

Table 10 Evacuation time under condition 11 after changing proportion of the elderly

速度提高比例(%)	10%		20%		30%		40%	
	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二	方案一	方案二
0	462.5	468.3	483.5	478.5	505.5	511.0	542.8	541.3
1	449.0	468.3	490.0	483.5	494.5	514.3	538.0	539.3
2	450.5	458.0	469.8	476.3	501.3	505.5	543.8	539.0
3	451.0	459.5	476.5	471.5	504.5	495.5	522.8	542.5
4	447.8	454.3	464.5	470.3	501.0	492.0	516.8	530.3
5	439.3	448.8	462.5	471.3	490.8	492.3	521.5	520.5
6	432.8	437.0	466.0	468.0	483.5	483.0	517.0	520.0
7	433.0	439.5	460.0	465.8	474.3	478.5	517.3	516.8
8	432.0	445.5	453.3	444.5	488.8	480.8	507.8	498.5
9	427.5	431.5	449.5	450.5	485.0	475.3	508.0	505.5
10	429.0	430.5	449.5	455.3	469.8	479.3	506.5	501.8
11	424.8	432.5	442.8	450.3	464.5	461.8	500.8	498.3
12	418.5	421.0	440.8	441.3	456.0	468.0	495.5	488.5
13	409.5	427.0	435.3	438.8	459.3	461.5	484.8	484.3
14	410.8	424.3	434.0	438.3	450.0	459.5	476.5	484.8
15	412.3	416.3	427.0	432.0	452.5	458.3	493.3	482.0
16	411.3	412.3	425.0	429.5	446.8	442.8	483.3	477.0
17	399.8	403.0	425.5	425.3	443.3	443.3	478.5	472.3
18	393.8	404.0	420.5	417.5	434.3	441.8	468.5	468.0
19	399.3	405.3	417.8	422.5	435.8	445.5	459.3	472.8
20	392.8	403.8	418.8	419.0	435.8	437.8	461.5	467.8

注:(单位:s)

由计算结果可知,在速度不改变的情况下,随着中老年人比例的增加,由于中老年人速度相对缓慢,导致人员平均速度降低,疏散时间逐渐增加。在工况八方案一的情况下,中老年人比例为40%时,疏散时间为663.5 s,当中老年人比例为10%时,疏散时间为563.3 s。人员比例每降低1%,平均疏散时间降低3.34 s。考虑到现实因素,中老年人的比例为10%。此时疏散时间大于7 min。若取最优速度增加量为20%,中老年人比例变为10%,并且对人员进行有序疏散。以工况十一为例,方案一情况下得到总的疏散时间变为392.8 s,比初始结果475.5 s降低了82.7 s,大大提高了疏散时间,并且符合安全疏散时间的标准。

3 应急疏散对策研究

综上所述可知,地震灾害诱发办公楼火灾发生时,提高人员速度、规范人员行为、改变人员比例对总疏散时间控制均有较好的效果。对于规范人员行为和提高速度可以通过增加培训、增加演习次数等措施来实现,既可以提高人们的警觉意识,增强人们的危机应变能力,还可以对消防预案进行检验,找出已有消防安全预案中存在的缺陷与不足,验证其可行性,并完善改进。此外,也可以通过增设特定形状的触摸型指示标志,保证防火门、灭火器等设备来对防火设施进行改善,使他们有效的发挥最大效能。火灾应急疏散对策如图12所示。

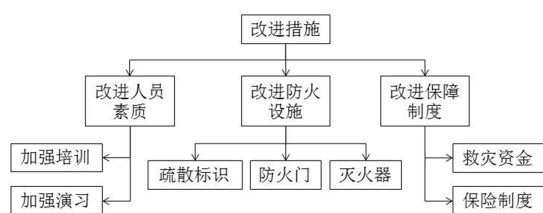


图12 火灾应急疏散对策

Fig.12 Emergency evacuation measures during fire disaster

4 结论

本文以地震灾害诱发火灾次生灾害为背景，以某办公楼为例，借助Pathfinder软件构建仿真模型，为办公楼建筑内人员疏散设计方案提供应用方面的借鉴。获得主要研究结论如下：

(1) 通过研究可知，人员速度和人员比例是影响人员疏散的因素，增加速度或者降低中老年人的比例会减少疏散时间。但增大速度或者改变人员比例到一定界限所带来的影响会慢慢减弱，而非纯线性变化。

(2) 对人员行动进行引导，如合理增加火灾过程中的人员等待时间可减缓人员拥挤情况，降低疏散时间。

(3) 通过火灾模拟与量化分析，找到了相对最优的速度和人员比例，为同类型火灾疏散提供了重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] Thiago Tinoco Pires. An approach for modeling human cognitive behavior in evacuation models[J]. Fire Safety Journal, 2004, 40(2): 177-189.
- [2] Li Z, Tang M, Liang D, et al. Numerical simulation of evacuation in a subway station[J]. Procedia Engineering, 2016 (135): 616-621.
- [3] 赵哲, 陈清光, 王海蓉, 等. 基于Pathfinder的公众聚集场所的应急诱导疏散[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(12): 1327-1330.
- [4] 杜晓燕, 程五一, 王子健, 等. 基于Pathfinder的突发事件下车间工人行为特征研究[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(04): 573-575.
- [5] 张丽姣. 室内大型活动突发事件人员疏散模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [6] 赵小惠, 王恒. 高层建筑火灾初期人员疏散策略研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2016, 31(04): 27-32.
- [7] 马清源, 王晨, 陆键, 等. 仿真技术在高铁车站疏散性能评估中的应用[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(02): 173-177.
- [8] 袁松如, 李成龙. 应用Pathfinder软件研究安全出口参数对疏散的影响[J]. 武警学院学报, 2016, 32(08): 13-16.
- [9] 陈岩. 基于Pathfinder的医院人群疏散仿真研究[J]. 河南科技, 2018(29): 107-109.
- [10] 田水承, 陈洋, 沈小清, 等. 基于Pathfinder对出口形状的疏散模拟及优化[J]. 消防科学与技术, 2018, 37(012): 1660-1662.
- [11] 王志帅, 朱权洁, 张震, 等. 某高校办公楼火灾模拟与应急疏散仿真研究[J]. 华北科技学院学报, 2021, 18(2): 109-118.
- [12] Li M, Zhu S, Wang J, et al. Research on fire safety evacuation in a university library in Nanjing[J]. Procedia Engineering, 2018(211): 372-378.
- [13] Qin J, Liu C, Huang Q. Simulation on fire emergency evacuation in special subway station based on Pathfinder[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2020(21): 1-7.
- [14] 黄有波, 吕淑然, 杨凯. 大型办公场所火灾与应急疏散研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(08): 1005-1009.
- [15] 陈雅萌, 王晨. 基于Pathfinder的高校学生宿舍楼火灾疏散数值模拟[J]. 中外建筑, 2019(05): 214-216.
- [16] 涂沁颖, 熊康. 基于Pathfinder的重庆某枢纽站台火灾人员疏散研究[J]. 山西建筑, 2020, 46(17): 186-188.
- [17] 阎卫东, 张瑞, 刘家喜, 等. 基于Pathfinder的高校图书馆火灾疏散研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 627-633.
- [18] 中华人民共和国建设部. 办公建筑设计规范: JGJ67-2006[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [19] 中华人民共和国公安部. 建筑设计防火规范: GB50016-2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.